

УДК 621.373.826.038.823

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ  
ЛАЗЕРА НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ ПРИ  
ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ**А.Е. Дегтярев<sup>1</sup>, Ф.А. Губарев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Томский политехнический университет<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: gubarevfa@tpu.ru

**Дегтярев Андрей Евгеньевич**, магистрант кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: degtyarev\_ae@mail.ru

Область научных интересов: системы управления, цифровая электроника, лазеры на парах металлов.

**Губарев Фёдор Александрович**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ, научный сотрудник лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.

E-mail: gubarevfa@tpu.ru

Область научных интересов: физика лазеров, лазеры на парах металлов, газовый разряд.

В работе представлен вариант реализации беспроводной передачи данных при помощи импульсного газового лазера на парах брома меди. Продемонстрирована возможность частотно-импульсной модуляции излучения лазера на парах брома меди в соответствии с цифровым кодом, поступающим с персонального компьютера. Для передачи логической единицы период повторения импульсов накачки лазера уменьшался, для передачи логического нуля – увеличивался. Показано, что изменение периода повторения импульсов на 1 мкс уже оказывает заметное влияние на мощность генерации. Представлены экспериментальные результаты по влиянию модуляции импульсов возбуждения на электрические параметры работы газоразрядной трубки и мощность генерации лазера на парах брома меди при различной величине отклонения периода повторения импульсов от периода несущей частоты.

**Ключевые слова:**

Оптическая связь, загоризонтная связь, беспроводная связь, лазер на парах брома меди, частотная модуляция излучения.

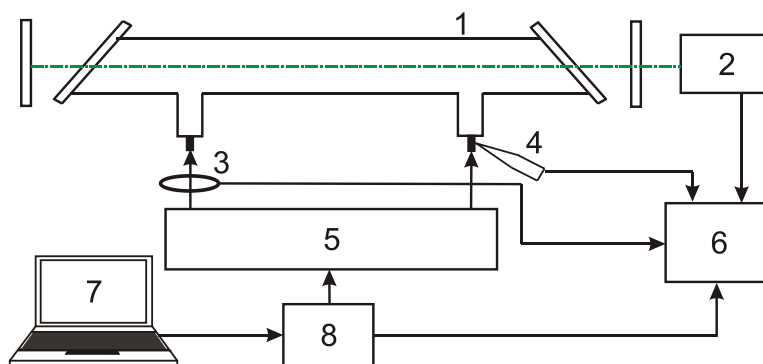
Одной из беспроводных технологий передачи данных является связь по оптическому каналу. Линию связи, в которой оптический сигнал распространяется в атмосфере, называют атмосферно-оптической линией связи (АОЛС). Возможны два варианта реализации канала АОЛС: когда передатчик и приемник излучения располагаются в зоне прямой видимости и вне зоны прямой видимости (в том числе загоризонтная связь) [1–6]. В загоризонтной связи используется сигнал, отраженный от атмосферных объектов, например аэрозолей. Такая система позволяет передавать информацию на большие расстояния. Наиболее длинная известная авторам АОЛС реализована между островом Тасмания и материковой Австралией и составляет 288 км [2]. Авторами работы [2] реализована передача данных в режиме частотно-импульсной модуляции с несущей частотой 1 кГц. В качестве передатчика применялся блок сверхярких светодиодов.

Одним из источников излучения для АОЛС может являться импульсный лазер на парах металла. Данный тип лазеров характеризуется высокой энергией в импульсе генерации при относительно низкой средней мощности [7], что дает возможность получения сигнала-отклика, достаточного для устойчивого приема с использованием фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [6]. При этом частота следования импульсов генерации лазеров на парах металлов достигает сотен килогерц [7].

Впервые частотно-импульсное кодирование излучения лазера на парах брома меди было реализовано в работе [5]. В работе [6] сообщается об успешной реализации АОЛС с использованием данного типа лазеров и передаче текстовой информации в цифровом формате на расстояние более 10 км. Авторами работы [6] отмечается наличие ошибок при передаче информации, связанных с изменением оптической плотности атмосферного объекта (дымового

шлейфа) или аппаратными ошибками. Возможной причиной ошибок может являться изменение энергии в импульсах генерации лазера в процессе передачи информации. Меньшей энергии в импульсе генерации будет соответствовать меньшее соотношение сигнал/шум при приеме. В связи с этим целью данной работы являлось исследование влияния передаваемой информации, т. е. изменений периода следования импульсов в процессе передачи информации, на энергию генерации CuBr-лазера.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался лазер на парах брома меди, аналогичный применяемому в работе [6] и исследованному в работах [8, 9]. Активная область газоразрядной трубки (ГРТ) имела 90 см в длину и 5 см внутреннего диаметра. Применялся независимый нагрев активной зоны ГРТ и контейнеров, что обеспечивало постоянный температурный режим независимо от параметров возбуждения. Средняя мощность генерации при частоте следования импульсов (ЧСИ) 19,2 кГц и мощности накачки 1,2 кВт (мощность, потребляемая импульсным источником питания от сети) составляла 5,1 Вт. Активная добавка HBr, часто применяемая для повышения средней мощности генерации [7], в данной работе не использовалась. Источник накачки лазера реализован на основе схемы прямого разряда накопительного конденсатора через тиратрон. Заряд накопительного конденсатора в данной схеме осуществляется импульсно и управляется микроконтроллером [10]. Схема управления источником накачки имеет вход синхронизации, позволяющий контролировать период следования импульсов возбуждения.



**Рис. 1. Схема эксперимента:** 1 – лазер; 2 – фотоприемник; 3 – датчик тока; 4 – высоковольтный щуп; 5 – импульсный источник питания; 6 – осциллограф; 7 – персональный компьютер; 8 – интерфейс

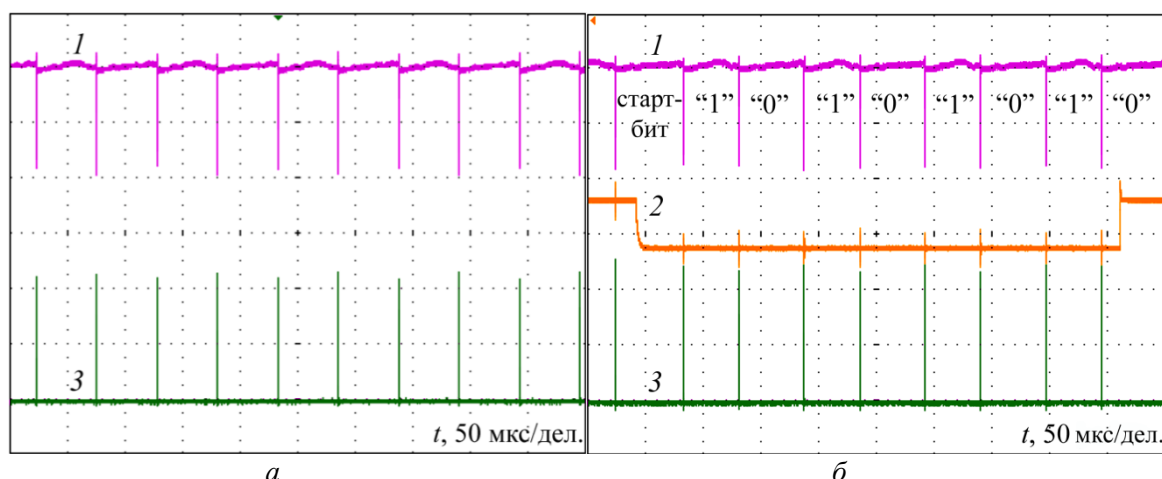
В работе использовалась следующая измерительная аппаратура: измеритель средней мощности Ophir 30C-SH, датчики тока Pearson Current Monitors 8450, пробник напряжения Tektronix P6015A, коаксиальный фотоземлет ФК-22, осциллограф LeCroy WJ-324.

Для формирования импульсов запуска для лазера изготовлен интерфейсный блок 8 (рис. 1) на основе микроконтроллера AVR Atmega16 [11]. Передача данных между интерфейсным блоком и персональным компьютером или ноутбуком осуществляется по каналу USB, реализованному с использованием микросхемы FT232RL [12]. Формируемые блоком синхросигналы для запуска лазера передаются посредством оптоволоконного передатчика HFBR-1522 [13]. Применение гальванической развязки вызвано необходимостью защиты от высокочастотных помех, генерируемых лазером в процессе работы.

Система управления, построенная с использованием микроконтроллера, позволяет осуществлять работу лазера в двух режимах: в обычном режиме и режиме передачи данных. В обычном режиме генератор формирует импульсы запуска для лазера с постоянным периодом повторения, соответствующим несущей частоте (рис. 2, а). Данный режим использовался во время разогрева лазера и выхода на номинальный режим генерации. Исследования проводились при несущей частоте 19,2 кГц (период 52 мкс).

В режиме передачи генератор принимает данные в ASCII кодах (буквы и цифры) с персонального компьютера и в зависимости от того, какие данные передаются, изменяет время между импульсами. Если передается логическая единица, то период уменьшается, если переда-

ется логический ноль, то увеличивается. На рис. 2, б показана последовательность импульсов напряжения на ГРТ и генерации при передаче числа #AAh (ASCII код), равного #10101010b (в бинарном коде), которая демонстрирует, как кодируются логические «1» и «0», а именно как изменяется период следования импульсов накачки и генерации в процессе передачи информации. Поскольку при передаче данных изменяется время между импульсами, для устойчивой синхронизации осциллографа интерфейсным блоком формируется дополнительный импульс синхронизации перед началом передачи байта информации.



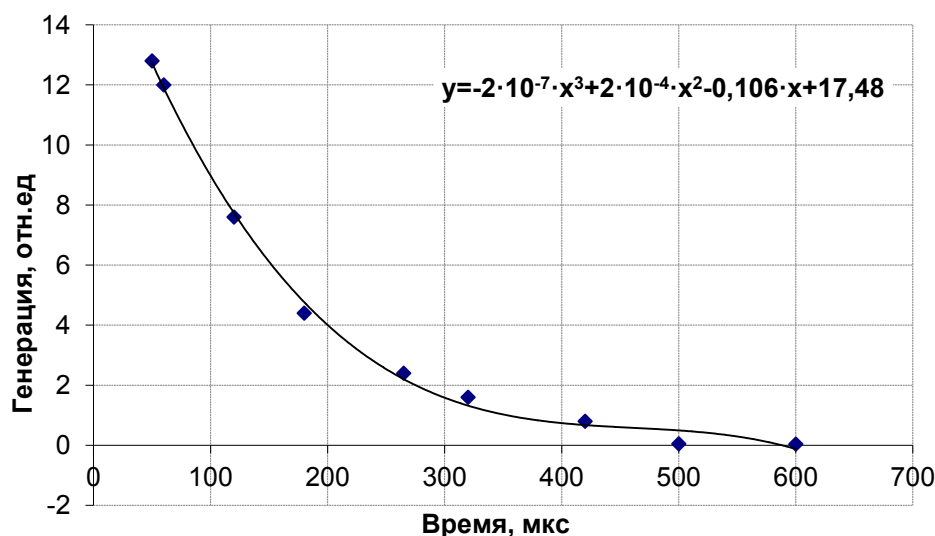
**Рис. 2.** Осциллограммы в обычном режиме (а) и в режиме передачи данных (б): 1 – напряжение на ГРТ лазера (5 кВ/дел.); 2 – импульсы синхронизации (5 В/дел.); 3 – последовательность импульсов генерации (отн. ед.)

В работе рассмотрены три варианта частотно-импульсной модуляции излучения с разным отклонением  $\Delta T$  от периода несущей частоты: 4, 2 и 1 мкс. В табл. 1 приведены параметры частотно-импульсного кодирования генерации CuBr-лазера при передаче логического «0» и логической «1». Для всех режимов передачи данных время между импульсами для старт-бита составляло 58 мкс.

**Таблица 1.** Параметры частотно-импульсного кодирования генерации CuBr-лазера

| Несущая частота,<br>кГц | $\Delta T$ ,<br>мкс | Время между импульсами при формировании |    | Энергия в импульсе генерации при передаче |     |
|-------------------------|---------------------|---|----|---|-----|
|                         |                     | 0                                       | 1  | 0   | 1   |
|                         |                     | мкс                                     |    | мкДж                                      |     |
| 19,2                    | 1                   | 53                                      | 51 | 271                                       | 260 |
|                         | 2                   | 54                                      | 50 | 265                                       | 244 |
|                         | 4                   | 56                                      | 48 | 275                                       | 234 |

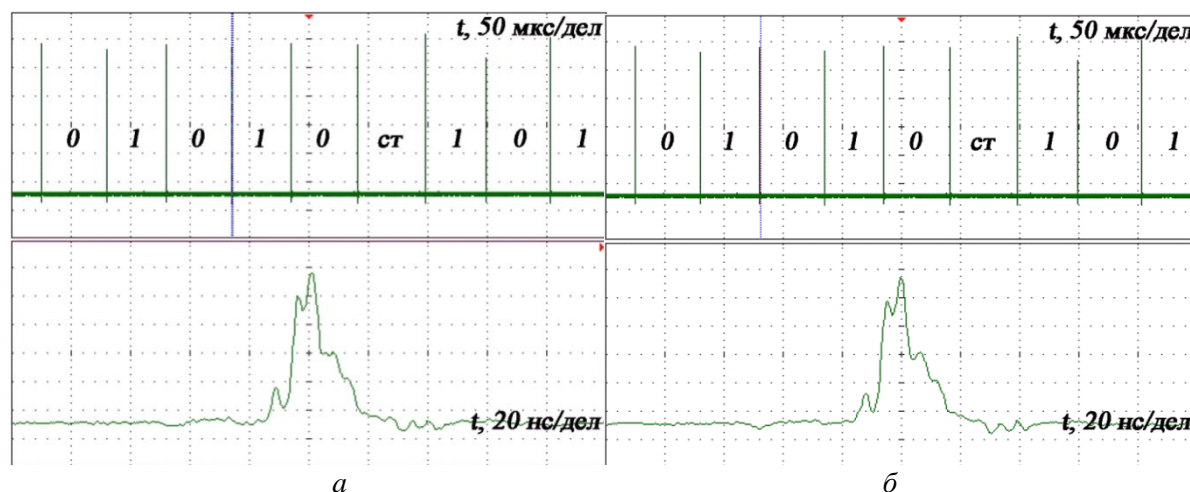
На рис. 3 приведены результаты исследования цугового режима для ГРТ диаметром 3,5 см и длиной активной зоны 56 см, исследованной ранее в работе [14]. Как следует из графика, наблюдается снижение энергии генерации в первых импульсах после паузы, которое мы связываем со снижением концентрации атомов меди в основном состоянии. Для представленной на рис. 3 зависимости можно записать аппроксимирующую кривую и оценить, насколько уменьшится пиковая мощность импульса генерации при изменении задержки между импульсами от 48 до 56 мкс. Расчеты показывают, что энергия в импульсе генерации должна варьироваться в пределах  $\sim 6\%$ .



**Рис. 3.** Зависимость пиковой мощности генерации в первом импульсе цуга от паузы между цугами

На рис. 4–6 представлены осциллограммы работы лазера при циклической передаче числа #10101010b при различных величинах  $\Delta T$ . По осциллограммам мгновенной мощности генерации рассчитана энергия в импульсе. Калибровка показаний ФК-22 осуществлялась по средней мощности генерации в обычном режиме. Значения энергии в импульсе генерации представлены в табл. 1. Наибольшая разницы энергии генерации  $\Delta E = 41$  мкДж (17 %) наблюдается при наибольшем  $\Delta T = 4$  мкс, что отличается от приведенных выше оценок. При  $\Delta T = 1$  мкс, как в работе [6],  $\Delta E = 11$  мкДж (4 %). Причем энергия генерации возрастает с увеличением межимпульсного периода.

В табл. 2 представлены значения энергии генерации в импульсах при передаче чисел #11h (#00010001b) и #77h (#01110111b) при  $\Delta T = 4$  мкс. Из полученных данных следует, что энергия генерации, соответствующая логическому «0» (или логической «1»), меняется менее чем на 6 % при передаче слов с различным количеством логических «0» (логических «1»). Таким образом, можно сделать вывод, что в представленных экспериментах концентрация атомов меди не является основной причиной снижения энергии в импульсах генерации.



**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов генерации при передаче «0» (а) и «1» (б) при  $\Delta T = 1$  мкс

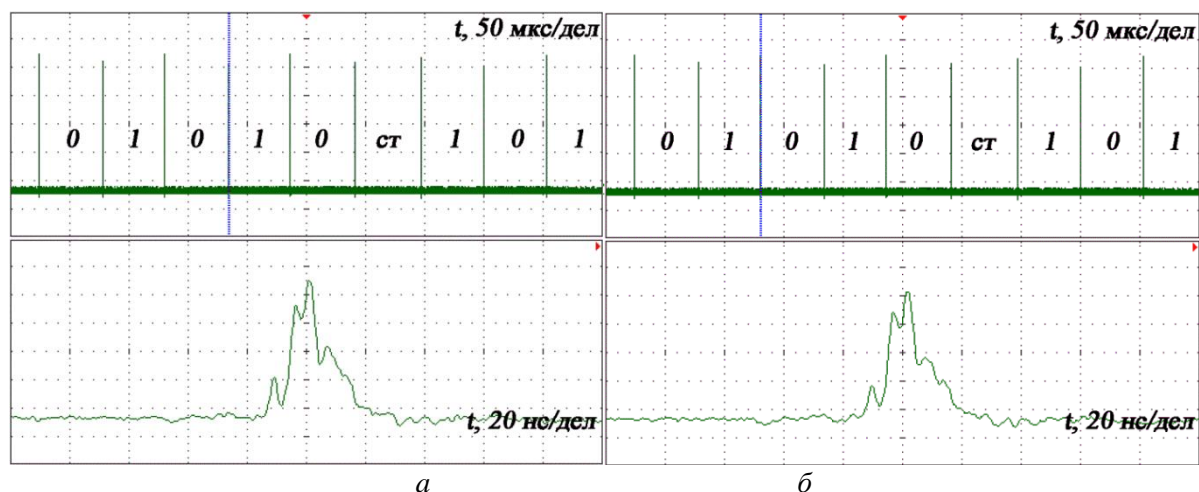


Рис. 5. Осциллограммы импульсов генерации при передаче «0» (а) и «1» (б) при  $\Delta T = 2$  мкс

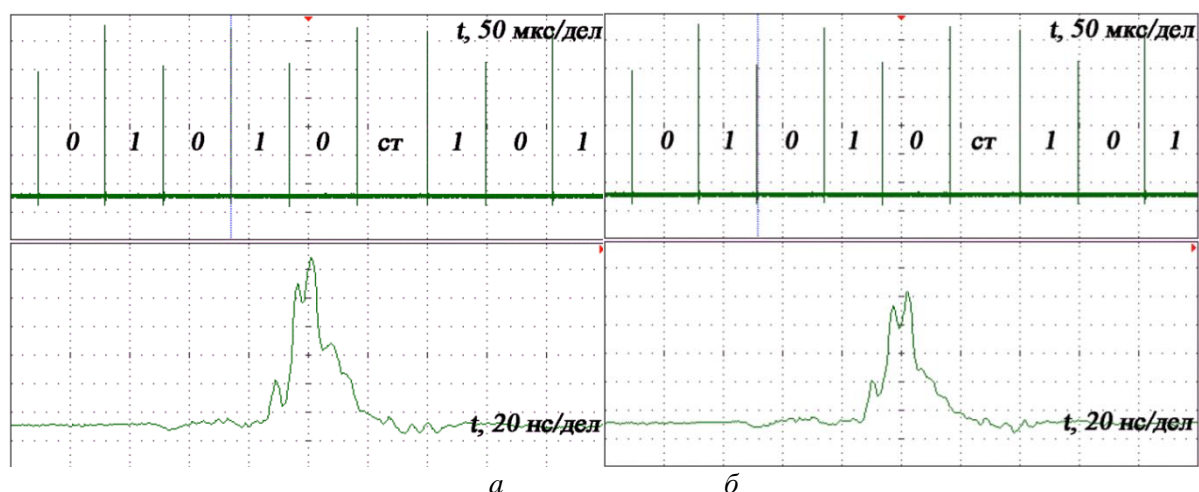


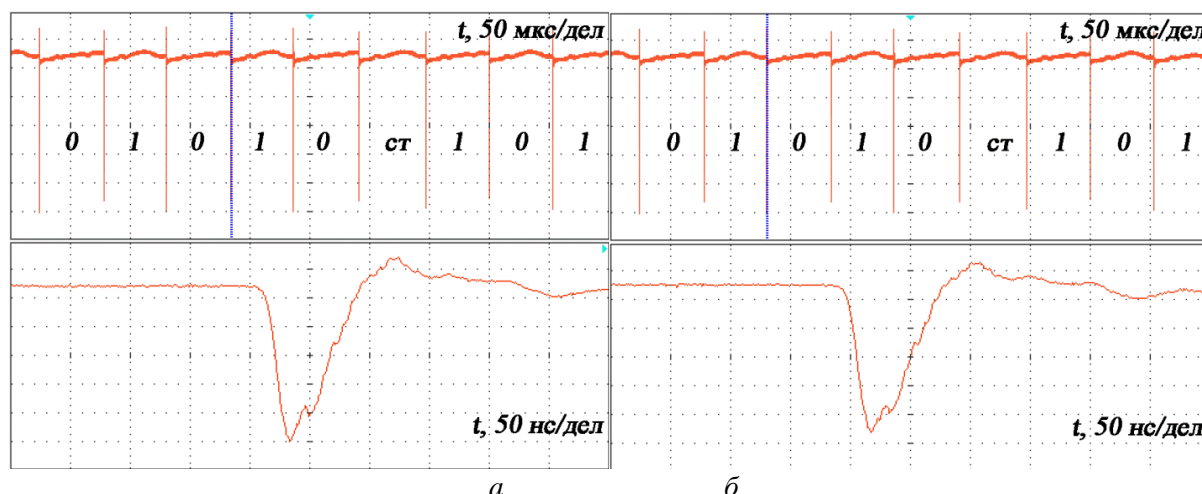
Рис. 6. Осциллограммы импульсов генерации при передаче «0» (а) и «1» (б) при  $\Delta T = 4$  мкс

Таблица 2. Энергия в импульсах генерации при циклической передаче чисел #11h, #77h

| Число | Генерация, мкДж |     |     |     |
|-------|-----------------|-----|-----|-----|
|       | 0               |     | 1   |     |
| #11h  | 276             | 260 | 265 | 245 |
|       | Генерация, мкДж |     |     |     |
|       | 0               |     | 1   |     |
| #77h  | 271             | 245 | 255 | 253 |

Снижение энергии генерации можно объяснить увеличением концентрации электронов и атомов меди в метастабильном состоянии при уменьшении периода повторения импульсов, даже если период уменьшается незначительно. Об увеличении концентрации электронов свидетельствует уменьшение напряжения на ГРТ при передаче логической «1» (рис. 7).





**Рис. 7.** Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (2 кВ/дел) при передаче «0» (а) и «1» (б) при  $\Delta T = 1$  мкс

Итак, в работе представлен вариант реализации беспроводной передачи данных при помощи импульсного газового лазера на парах брома меди. Продемонстрирована возможность частотно-импульсной модуляции излучения CuBr-лазера в соответствии с цифровым кодом, поступающим с персонального компьютера.

При передаче данных с использованием описанной техники следует иметь в виду, что в зависимости от режима передачи может наблюдаться существенное (до 17 %) отличие энергии генерации при передаче логического «0» и «1». Учитывая столь существенное изменение энергии в импульсе генерации, можно сделать вывод, что для задач загоризонтной связи, где энергия в импульсе является критическим параметром, необходимо уменьшать разницу периода повторения импульсов при кодировании «0» и «1» с целью обеспечения примерно одинакового уровня энергии в импульсах генерации.

*Авторы выражают благодарность профессору Томского политехнического университета Г.С. Евтушенко за интерес к работе и полезные комментарии.*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00175).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Украинцев Ю.Д., Цветов М.А. История связи и перспективы развития телекоммуникаций. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 128 с.
2. Moncur R., Smith D., Gelston J., Giles-Clark J. 288 km Cloud bounce from Tasmania to the Australian Mainland. – URL: [http://reast.asn.au/optical/288\\_km\\_Cloudbounce\\_from\\_Tasmania\\_to\\_the\\_Australian\\_Mainland.pdf](http://reast.asn.au/optical/288_km_Cloudbounce_from_Tasmania_to_the_Australian_Mainland.pdf) (дата обращения 04.07.2014).
3. Mooradian G.C., Geller M., Levine P.H., Stotts L.B., Stephens D.H. Over-the-horizon optical propagation in a maritime environment // *Applied Optics*. – 1980. – V. 19 (1). – P. 11–30.
4. Милютин Е.Р. Загоризонтные оптические линии связи // *Вестник связи*. – 2005. – № 4. – С. 196–199.
5. Васильев А.С., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф. Передача информации с использованием лазера на парах брома меди // *Современные техника и технологии: XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 18–22 апреля 2011*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т. 1. – С. 166–167.
6. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин и др. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 26. – № 4. – С. 261–267.

7. Евтушенко Г.С. Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 276 с.
8. Gubarev F.A., Evtushenko G.S., Vuchkov N.K., Sukhanov V.B., Shiyarov D.V. Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization // Review of Scientific Instruments. – 2012. –V. 83. – P. 055111–055115.
9. Влияние индуктивности разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера / Ф.А. Губарев, М.В. Тригуб, К.В. Федоров, Г.С. Евтушенко // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 7. – С. 604–609.
10. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт / В.А. Димаки, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, А.Г. Филонов // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 5. – С. 95–99.
11. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash. – URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf> (дата обращения 04.07.2014).
12. Future Technology Devices International Ltd. FT232RUSBUSARTIC. – URL: <http://pdf.datasheet.su/ftdi/ft232rl.pdf> (дата обращения 04.07.2014).
13. HFBR-0500Z Series. Versatile Link. The Versatile Fiber Optics Connection. – URL: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1501EN> (дата обращения 04.07.2014).
14. Восстановление молекул бромида меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период / С.Н. Торгаев, Ф.А. Губарев, А.М. Бойченко и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 201. – № 2. – С. 81–84.

Поступила 06.10.2014